Banque de simulations
couronne-vent solaire
Projet de SO

12 avril 2012

Responsable : Roland Grappin (LUTH)
e-mail : Roland.Grappin@obspm.fr

Table des matières

1 Résumé

- *Collaborateurs à l'Observatoire de Meudon* - F. Pantellini, G. Aulanier (LESIA)
- *Collaborateurs extérieurs* Y.-M. Wang (NRL), A. Verdini (Bruxelles-Florence)
- *Objectifs* - fournir aux physiciens solaires un moyen de visualiser des profils calculés d'atmosphère et de vent solaire, en fonction de différents paramètres physiques, en sélectionnant des résultats dans une banque de résultats de simulations obtenues à partir du code VP.
- *Description du code numérique VP* - le code numérique qui est la source des résultats stockés dans la banque est un code 1D de vent solaire hydrodynamique, le taux d'expansion local du champ magnétique le long de la ligne de champ contenant l'information sur la structure magnétique. Le point fort du code est sa stabilité, due aux conditions aux limites caractéristiques, ce qui permet d'aller de la surface solaire jusqu'à typiquement $50R_s$. Le code a donné lieu à cinq travaux publiés depuis 2009.
- *Description de l'outil Web* - l'utilisateur choisit sur un panneau web le(s) calcul(s) et les champs qu'il veut voir représenter, règle les paramètres de l'affichage, il obtient en retour une page avec les différents champs. Les paramètres caractérisant les calculs sont en particulier le flux d'énergie provenant de la surface, la hauteur et le mode de dissipation dans l'atmosphère, l'expansion locale des tubes de flux magnétique, l'amplitude des ondes d'Alfvén à la surface, ainsi que l'expression du flux de chaleur conductif, l'ionisation partielle...
- *Description technique* - le travail scientifique produit jusqu'à présent avec le code VP (voir bibliographie) utilise pour le dépouillement un ensemble de procédures IDL. Le projet propose de développer (i) un interface Web pour lancer ces procédures IDL (ii) un script écrit en Perl pour traduire l'information Web en mots-clé IDL qui sont transmis aux procédures. Cette technique est simple et ne nécessite pas l'emploi d'un ingénieur pour ce projet (en-dehors de conseils au coup par coup).
- *Délai de développement* - premier prototype juillet 2012, début de l'alimentation de la banque de données automne 2012, ouverture de l'interface Web fin 2012.
- *Futurs développements* - dans une version future, le code sera couplé avec un code d'extrapolation PFSS du champ solaire mesuré à la surface (code fourni par Y.M. Wang).

2 Introduction

Nous ne sommes pas les premiers à proposer une base de données de résultats de simulations numériques, mais nous pensons utile de rappeler l'intérêt de ce type de projet. Un travail de recherche basé sur des simulations numériques donne lieu (comme pour des données d'observation) à un gros travail de sélection : on analyse en détail une petite partie des calculs, on ne publie et on on ne discute qu'un faible sous-ensemble des données accumulées. On peut légitimement penser que, avec un outil de consultation bien fait, permettre aux autres chercheurs la manipulation et la visualisation de l'ensemble des données peut être très utile.

D'un point de vue théorique, une base de données de calculs peut être utile tout simplement parce que visualiser autrement permet de mieux comprendre, et peut-être voir ce qui a échappé aux auteurs du calcul. Par ailleurs, il est courant, dans une recherche, de commencer par reproduire des travaux déjà faits. La possibilité de visualiser autrement ces calculs peut aider à ce travail-là aussi.

Du point de vue du diagnostic, une telle base peut servir d'outil de diagnostic inverse en aidant à déterminer les paramètres physiques permettant de reproduire une situation observée.

Dans le cas du soleil et du vent solaire, de nombreuses approches numériques sont possibles. Nous avons choisi ici de proposer un code fluide 1D décrivant un certain nombre de phénomènes physiques : conduction, pertes radiatives, pression d'ondes d'Alfvén. Une solution, à un instant donné, consiste en une série de profils de quantités physiques (vitesse, température(s), densité et quantités dérivées) le long de la coordonnée de l'abscisse le long du champ magnétique, supposé aligné avec la verticale. Il s'agit donc de modéliser le vent issu d'une zone dite “ouverte”.

La modélisation physique du vent que l'on utilise et que l'on détaillera plus loin est semi-empirique, en ce sens que beaucoup de points de physique ne sont pas décrits en détail, comme on le verra au chapitre "description physique". Par exemple, une des versions du modèle utilise un flux d'énergie (qui tourne autour de 100 W/m^2 à la surface dans un tube de flux à expansion radiale) qui est à l'origine du chauffage de la couronne et est déterminé par l'amplitude locale du champ magnétique. La justification de ce modèle est d'abord empirique : son pouvoir prédictif est remarquable (voir la bibliographie sur l'utilisation du code). Sa justification théorique reste faible : le modèle repose sur l'hypothèse que la reconnexion (modèle de Parker) fournit une grosse partie de la source, mais dans un modèle 1D il est exclu de la modéliser en détail. Par ailleurs, on peut (ou non) inclure une pression d'ondes dans le modèle, ce qui permet d'atteindre les vitesses élevées ca-

ractéristiques des vents rapides. Cependant, nous ne savons précisément pas quelle est vraiment la contribution de la dissipation de ces ondes dans le chauffage de la couronne et du vent.

Le modèle proposé n'est, pour le moment en tout cas, pas un modèle de type "climat spatial" ou "space weather" qui permettrait une prédiction détaillée à partir de la connaissance de la situation solaire à la surface. En fait, de tels modèles (e.g. [7]) sont très lourds numériquement (3D) et utilisent en général des relations empiriques encore bien plus "résumées" que les raccourcis que nous venons d'esquisser, comme par exemple la relation de Wang-Sheeley-Arge [8] qui permet de relier directement le taux d'expansion du champ magnétique dans la couronne à la vitesse terminale. Le modèle que nous proposons vient en amont de tels modèles, il est léger numériquement parlant, il sert à comprendre quand ces relations fonctionnent et pourquoi, il permet donc d'aboutir à de tels modèles de type "climat spatial", mais il n'en est pas un.

Dans la suite, nous décrivons les objectifs poursuivis, l'équipe du projet, la physique contenue dans le code, les résultats déjà obtenus, la technique utilisée pour la visualisation lointaine des résultats.

3 Objectif et fonctionnement de la base

L'objectif de la banque de données est de permettre à l'utilisateur de croiser les paramètres physiques du modèle d'atmosphère solaire et de vent solaire (détaillés plus loin) pour

- visualiser l'impact du choix des paramètres du calcul sur les observables (vitesse, température, densité)
- permettre de refaire le même calcul avec un autre code/modèle physique
- pouvoir faire un diagnostique inverse i.e. déterminer par essai et erreur quels sont les valeurs des paramètres les plus probables reproduisant tels observables

Pour réaliser cet objectif, nous comptons présenter dans un premier temps un ensemble de N calculs sur la base avec un mode d'emploi détaillé pour analyser et afficher les résultats existants. Il est bien évident qu'au début tout au moins, la base sera probablement insuffisamment remplie en valeurs des paramètres, les utilisateurs devraient donc la plupart du temps demander des calculs supplémentaires dans des gammes de valeurs non encore explorés. Le système fonctionnera donc le plus souvent à la demande dans cette première phase, c'est-à-dire que l'équipe en charge de la base lancera les calculs demandés (ou aidera à les lancer). On notera que le responsable de la base (R. Grappin) a une certaine expérience dans ce domaine. Depuis environ 4 ans,

il a en effet fonctionné de cette façon dans sa collaboration avec Y.M. Wang, au NRL.

Les directions futures peuvent être

– mettre l'accent sur la dynamique temporelle (événements du type éruptif)
– mettre l'accent sur l'extrapolation à partir de champs de surface mesurés (au lieu d'utiliser des expressions algébriques pour le taux d'expansion du champ, on utiliserait des extrapolations de type PFSS, le module pour cela étant fourni par Y.-M. Wang). Nous pourrions alors proposer des cartes de l'état du plasma à une distance donnée

4 Equipe travaillant sur la base

L'équipe de développement du projet se compose du responsable (R. Grappin, Luth), de F. Pantellini (Lesia), G. Aulanier (Lesia). Nous avons également deux collaborateurs extérieurs principaux qui sont Y.M. Wang (NRL) et A. Verdini (SIDC Bruxelles et Observatoire de Florence).

R. Grappin et F. Pantellini réaliseront le prototype et feront le gros du travail de mise au point du premier projet jusqu'à l'ouverture du site Web. Pendant cette première phase, G. Aulanier et Y.M. Wang auront le rôle de conseiller scientifique et testeront l'ensemble de l'outil.

En-dehors de la mise au point du projet, R. Grappin assurera sa tâche de service en tant qu'astronome, durant sa période d'activité :

– (i) en veillant au bon fonctionnement du code suivant les mises à jour (différents modules de physique additionnelle) qui seront faites
– (ii) en alimentant la base pour en optimiser l'utilisation
– (iii) en alimentant la base suivant les demandes des utilisateurs.

Une fois la période d'activité de R. Grappin terminée, le rôle de responsable devrait logiquement être pris, suivant leurs disponibilités respectives, soit par G. Aulanier, soit par F. Pantellini.

Pour le moyen terme, les membres de l'équipe devraient contribuer à l'amélioration du code numérique (et donc de la base) de plusieurs façons.

– F. Pantellini a une compétence reconnue dans le domaine des simulations à N corps, et devrait contribuer pour (i) l'expression non collisionnelle du flux de chaleur (ii) l'expression des instabilités liées aux anisotropies de pression
– G. Aulanier a une compétence reconnue dans le domaine de l'émergence des structures solaires et devrait contribuer à améliorer l'interface entre le code et l'activité de surface.
– Y.-M. Wang a une compétence reconnue dans le domaine de l'interrelation entre propriétés des structures solaires et propriétés du vent

solaire quasi-stationnaire ainsi que des événements intermittents. Nous avons collaboré lorsque nous sommes passé d'un modèle quasi-isotherme à un modèle incluant le bilan d'énergie et la description de la zone de transition chromosphérique en 2006, et nous avons continué depuis.

– A. Verdini et R. Grappin ont une compétence reconnue dans le modélisation et la simulation de la dissipation et du chauffage turbulent, ainsi que son effet sur le vent solaire et la couronne, et devraient contribuer à modéliser le chauffage turbulent de façon plus réaliste.

5 Modèle physique et numérique

5.1 Modèle physique

Le modèle choisi est un modèle fluide, et 1D. Le caractère non-collisionnel du vent solaire n'apparaît pour le moment que (i) par le biais d'une expression particulière du flux de chaleur qui limite l'amplitude du flux de chaleur (calculé via l'expression de Spitzer-Harm dans les couches denses) lorsque le nombre de Knudsen devient trop grand, (ii) par le découplage entre température des ions et des électrons (qui dépend de la densité et de le température).

Comme on l'a déjà dit, le choix d'un modèle 1D est justifié par son succès. Les couplages transverses absents du modèle sont en fait résumés dans le taux d'expansion non radial des tubes de flux magnétiques. On montre ici la première proposition de Kopp et Holzer [6] (fig. 1). Le taux d'expansion est

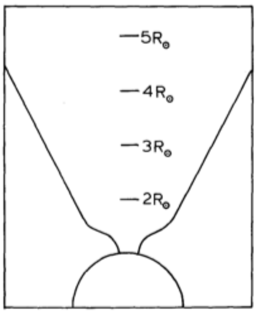


FIGURE 1 – Modèle simplifié d'expansion du champ magnétique [6], dont sont dérivés les modèles utilisés ici.

actuellement donné par un ou plusieurs modèles algébriques. Dans une phase ultérieure, il pourra être donné par l'extrapolation de données mesurées à la surface.

Le modèle de chromosphère est très simplifié, il se résume à (i) un thermostat dans la partie dense correspondant à la relaxation vers l'état d'équilibre dans un milieu optiquement épais (ii) un autre thermostat résumant le transfert "gris" dans la partie haute de la chromosphère. Le modèle de chromosphère simplifié est en fait là non pour étudier la chromosphère en soi, mais pour permettre une description physiquement raisonnable de la couronne et du vent solaire.

Ce qui précède assure la génération d'une zone de transition chromosphérique (TR). La position de la TR dépend de la modélisation ou non de l'ionisation partielle dans la chromosphère. Une version du code propose cette option. Suivant que l'ionisation est partielle ou totale, la position de la TR variera d'un facteur 2, mais en fait les paramètres de la couronne et du vent ne dépendent pas de la position de la TR, donc nous proposons la plupart du temps de débrancher l'option d'ionisation partielle, ce qui rend le code numériquement plus léger.

La transition se produit lorsque le libre parcours moyen des électrons s'approche de $0.1H$ où H est l'échelle de variation de la température. La figure 2) montre un cas typique où la transition se produit vers $5R_s$.

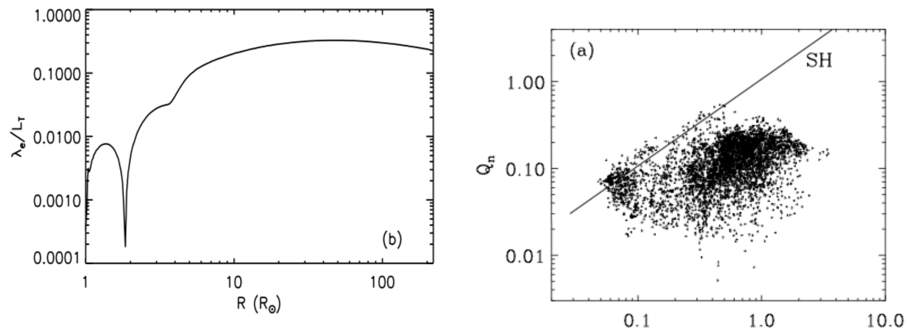


FIGURE 2 – A gauche : simulation numérique par [3], nombre de Knudsen $K = \lambda/H$ en fonction de la distance héliocentrique. A droite : mesures du flux de chaleur dans Wind par [4] (point : flux de chaleur normalisé ; droite : flux de Spitzer-Harm ; abscisse : nombre de Knudsen).

Le plasma est accéléré par (i) les ondes (pression d'ondes d'Alfvén) (ii) la pression du gaz. L'expression de ces deux termes ne posent pas de problème. Par contre l'évolution de la pression d'ondes avec la distance dépend de la dissipation turbulente, et l'évolution de la pression dépend en retour du chauffage turbulent. Dans la version actuelle, les ondes d'Alfvén ne se dissipent pas, tout le chauffage turbulent est supposé venir d'une autre source.

5.2 Le code numérique VP

Le code numérique qu'on se propose d'utiliser pour le projet a été développé dans sa version moderne, c'est-à-dire avec pour frontière inférieure la surface solaire, par R. Grappin, J. Léorat, Y.-M. Wang à partir de 2006. R. Pinto a contribué pour des parties importantes comme le taux d'expansion et le maillage. F. Pantellini et R. Grappin ont écrit la version bi-fluide du code.

Le code est un code hydrodynamique : le champ magnétique n'apparaît que par l'intermédiaire du taux d'expansion du tube du flux qui est une donnée du problème. On peut bien entendu faire varier ce taux d'expansion au cours du temps, mais les transitoires ne seront pas physiquement significatives.

Il inclut explicitement la chromosphère et la zone de transition chromosphérique, ainsi que la conduction de chaleur et les pertes radiatives. Une description sommaire du code dans sa version mono-fluide ($T_p = T_e$) est donnée dans [11] et [13].

Les quantités intégrées au cours du temps sont la vitesse radiale, la température et la pression. La densité est une quantité secondaire : la stabilité du code en est fortement améliorée.

Une autre propriété importante est le schéma spatial qui est quasi-spectral : on utilise une méthode implicite (implicite spatialement : c'est la définition de la dérivée spatiale qui est implicitement définie, donc est la solution d'un algorithme). Ceci permet une stabilité accrue surtout près des frontières et de la zone de transition. Mais la méthode ne permet pas un maillage $\delta r(i)$ non uniforme en utilisant simplement le jacobien du changement de variable $\delta i/\delta r$. Il faut coder directement l'expression dans l'algorithme définissant le maillage, ce qui a été fait lors d'un stage par Jean-Marie Le Saout, stagiaire de l'Ecole de Nantes (2003).

Enfin, les conditions aux limites sont écrites en résolvant la forme caractéristique des équations à la frontière inférieure. Ceci est un gros progrès par rapport aux codes qui intègrent à partir de la transition chromosphérique par exemple, où il est difficile d'imposer des conditions causale et donc stables.

5.3 Résultats obtenus avec le code VP

- Ce code a été à la base d'une partie importante de la thèse de Rui Pinto sur la génération et l'évolution temporelle des plumes solaires [13].
- Il a été utilisé pour montrer que les fortes "température de gel" (freezing in) observées dans le vent solaire lent pouvaient s'expliquer par la présence d'un fort chauffage dans la basse couronne [12].

– Il a été enrichi d'une version bi-fluide qui a permis de développer un modèle bi-fluide de plumes solaires, et a également montré la nécessité d'un chauffage des électrons et non seulement des ions dans la basse couronne [10].
– Il a permis de comprendre que, si la relation de Wang-Sheeley-Arge surestime la vitesse du vent dans les pseudostreamers, c'est parce que le taux d'expansion du champ magnétique au-dessus de ces structures varie de façon non monotone (d'abord très fortement, ensuite très faiblement, enfin avec expansion radiale). Ceci est illustré par la fig. 3. La

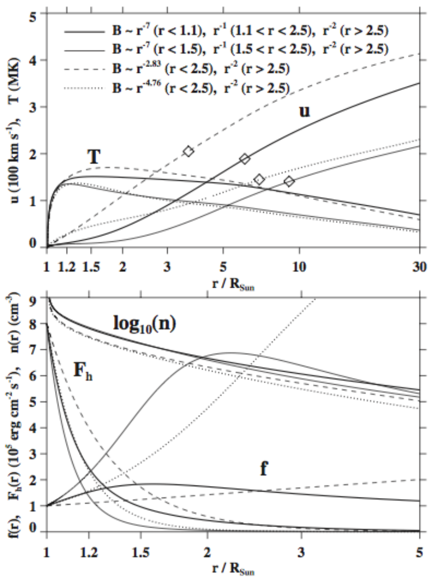


FIGURE 3 – Quatre solutions de vent hydrodynamique obtenues en variant la dépendance radiale du champ magnétique $B(r)$ dans la fonction de chauffage $F_h(r) = 8 \times 10^5$ erg cm^{-2} s^{-1} $(B/B_0)^{3/2}$. (1) $\nu = 7$, $R_X = 1.1R_s$ dans l'éq. 1 (trait épais). (2) $\nu = 7$, $R_X = 1.5R_s$ dans l'eq. 1 (traits fins). (3) $\nu = 2.83$ dans l'éq. 2 (tireté). (4) $\nu = 4.76$ dans l'éq. 2 (pointillé). La 3eme (4eme) solution est pour un tube de flux en expansion monotone ayant la même expansion nette à $r = Rss = 2.5R_s$ que la 1ere (2eme) solution. En haut : $u(r)[100$ $km/s]$ et température $T(r)[MK]$, tracés entre $r = R_s$ et $r = 30R_s$. Losanges : point sonique. En bas : densité des protons $Log_{10}[n(r)/cm^{-3}]$, densité de flux d'énergie mécanique $F_h(r)/(10^5$ erg cm^{-2} $s^{-1})$, et facteur d'expansion $f(r)$ entre $r = R_s$ et r, jusqu'à $r = 5R_s$.

légende de la figure fait référence à deux formes d'expansion du champ magnétique, non-monotone (1ère et 2ème courbes) et monotone (deux

dernières courbes) :

$$B(r) = B_0(R_s/r)^\nu \frac{1+(r/R_X)^{\nu-1}}{1+(R_s/R_X)^{\nu-1}} \frac{1+(R_s/R_{ss})}{1+(r/R_{ss})} \quad (1)$$

$$B(r) = B_0(R_s/r)^\nu \frac{1+(r/R_{ss})^{\nu-2}}{1+(R_s/R_{ss})^{\nu-2}} \quad (2)$$

La première forme décrit une expansion en r^ν entre la surface et un point R_X correspondant à un point X dans la topologie magnétique, puis une expansion en R jusqu'au point $R_{ss} = 2.5R_s$ au-delà duquel l'expansion est radiale ($\propto r^2$). La deuxième forme décrit une expansion passant de r^ν au-dessous de R_{ss} à r^2 ensuite. Seules les solutions non monotones décrivent correctement les propriétés des pseudostreamers.

6 Description technique du projet

Il faut distinguer (1) la génération des résultats et (2) leur visualisation à distance. Dans une première phase, seul la seconde activité est proposée de façon ouverte et publique, sur un site dédié à déterminer, sans doute une machine de l'observatoire de Meudon. Pour le moment, les calculs se font sur des ordinateurs portables, et les tests du système de visualisation également.

6.1 Génération de la banque de données

Dans une première phase, la génération des résultats est faite de façon manuelle : chaque calcul est lancé au coup par coup, et la banque de données est renseignée automatiquement à chaque nouveau calcul.

6.2 Visualisation à distance

Le principe de la visualisation et l'analyse des résultats par un utilisateur distant à partir d'une page Web est exposé dans [5] (cf. fig. 4). Le principe de base consiste à décrire sur l'interface Web les paramètres du choix (i) de la ou des simulations et (ii) de la visualisation. On choisit également le type de routine IDL Les paramètres choisis sont transmis à la routine IDL par un script Perl qui tourne en tâche de fond sur la machine. La routine IDL lit les données, et renvoie une ou plusieurs images png qui sont affichées sur le navigateur. Nous avons fait un premier prototype qui fonctionne.

Le résultat n'est pas fondamentalement différent de celui obtenu lorsqu'on s'adresse directement à la routine IDL sans l'intermédiaire de la page Web.

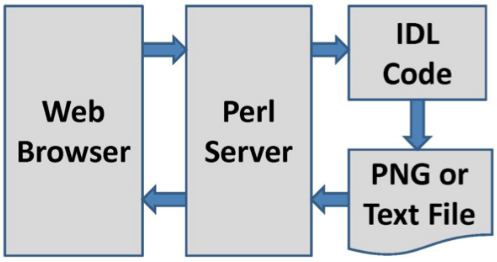


FIGURE 4 – Schéma décrivant les composants nécessaires pour qu'un outil Web appelle un code IDL. Le serveur Perl ne demande pas à être changé si on modifie l'outil Web et/ou les procédures IDL appelées.

7 Plan de travail

Nous nous proposons de réaliser un premier prototype d'ici fin juillet 2012. Nous demanderons à quelques utilisateurs de tester le code d'ici à la fin 2012, et nous proposerons une version publique à ce moment-là. Il faudra bien entendu alimenter la base pendant cette période. Cela sera fait progressivement.

Nous ne pensons demander qu'une aide ponctuelle à un ingénieur informaticien, mais nous ne prévoyons pas une aide permanente.

La base devrait s'améliorer au cours du temps, d'une part bien sûr en ergonomie du fait de la demande des utilisateurs, mais également du fait de l'amélioration du code lui-même qui devrait proposer de tenir compte d'effets physiques supplémentaires. Les deux grandes lignes futures devraient être d'une part les effets non collisionnels (anisotropie de pression, instabilités) ainsi que le chauffage turbulent, autrement dit un lien direct entre l'amortissement de l'amplitude des ondes et le chauffage.

8 Bibliographie

Références

8.1 Bibliographie générale

[1] Matteini, L., Hellinger, P., Landi, S., Trávnícek, P. M. & Velli, M. Ion Kinetics in the Solar Wind : Coupling Global Expansion to Local Microphysics. Space Science Reviews 60 (2011).doi :10.1007/s11214-011-9774-z

[2] Mangeney, A., Grappin, R. & Velli, M. MHD turbulence in the solar wind. Symposium on Geophysical and Astrophysical MHD as Part of the British Theoretical Mechanics Colloquium : Advances in solar system magnetohydrodynamics 327–356 (1991).

[3] Ko, Y.-K. Groth, C. P. T. On the Electron Temperature and Coronal Heating in the Fast Solar Wind Constrained by in-situ Observations. Space Science Reviews 87, 227 (1999).

[4] Salem, C. et al. Electron Properties and Coulomb Collisions in the Solar Wind at 1 AU : Wind Observations. The Astrophysical Journal 585, 1147 (2003).

[5] Davis W. Easy Web Interfaces to IDL Code for NSTX Data Analysis `http://www.pppl.gov/pub_report/2011/PPPL-4658.pdf` (2011)

[6] Kopp, R. A. & Holzer, T. E. Dynamics of coronal hole regions. I - Steady polytropic flows with multiple critical points. Solar Physics 49, 43 (1976).

[7] Downs, C. et al. Toward a Realistic Thermodynamic Magnetohydrodynamic Model of the Global Solar Corona. The Astrophysical Journal 712, 1219–1231 (2010).

[8] Arge, C. N., Luhmann, J. G., Odstrcil, D., Schrijver, C. J. & Li, Y. Stream structure and coronal sources of the solar wind during the May 12th, 1997 CME. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 66, 1295–1309 (2004).

8.2 Articles récents utilisant le code VP

[9] Wang, Y.-M., Grappin, R., Robbrecht, E. & Sheeley, N. R., Jr ON THE NATURE OF THE SOLAR WIND FROM CORONAL PSEUDOSTREAMERS. The Astrophysical Journal 749, 182 (2012).

[10] Grappin R, Wang Y-M and Pantellini F TWO-TEMPERATURE MODELS FOR POLAR PLUMES : COOLING BY MEANS OF STRONG BASE HEATING Astrophysical Journal 727 1–5 (2011)

[11] Grappin, R., Léorat, J., Leygnac, S. & Pinto, R. Search for a self-consistent solar wind model. TWELFTH INTERNATIONAL SOLAR WIND CONFERENCE. AIP Conference Proceedings 1216, 24–27 (2010).

[12] Wang Y.-M., Ko Y.-K., Grappin R. Slow Solar Wind from Open Regions with Strong Low-Coronal Heating. The Astrophysical Journal vol. 691 pp. 760 (2009).

[13] Pinto R., Grappin R., Wang Y.-M., Léorat J. Time-dependent hydrodynamical simulations of slow solar wind, coronal inflows, and polar plumes. Astronomy and Astrophysics vol. 497 (2) pp. 537-543 (2009).

8.3 Quelques articles récents de l'équipe sur la dynamique du soleil et son atmosphère

[14] Pinto R F, Brun A S, Jouve L and Grappin R COUPLING THE SOLAR DYNAMO AND THE CORONA : WIND PROPERTIES, MASS, AND MOMENTUM LOSSES DURING AN ACTIVITY CYCLE The Astrophysical Journal 737 72 (2011).

[15] Grappin R., Aulanier G., Pinto R., The MHD coupling between coronal dynamics and photospheric motions. Astronomy and Astrophysics vol. 490 pp. 353 (2008).

[16] Aulanier, G. ; Démoulin, P. ; Grappin, R., Equilibrium and observational properties of line-tied twisted flux tubes, A & A, 430, p.1067-1087 (2005)

8.4 Quelques articles récents de l'équipe sur la turbulence

[17] Andrea Verdini, Roland Grappin, Transition from weak to strong cascade in MHD turbulence, soumis à Phys.Rev.Lett (2012)

[18] Verdini, A., Grappin, R. & Velli, M. Coronal heating in coupled photosphere-chromosphere-coronal systems : turbulence and leakage. A&A 538, 70 (2012).

[19] Alexandrova O, Lacombe C, Mangeney A and Grappin R 2011 Fluid-like dissipation of magnetic turbulence at electron scales in the solar wind, soumis à Phys.Rev.Lett. (2012)

[20] Verdini, A., Grappin, R., Pinto, R. & Velli, M. On the origin of the 1/ f spectrum in the solar wind magnetic field. accepté par ApJ (2012).

[21] Gürcan, Ö. & Grappin, R. Anisotropic shell model of turbulence. Phys. Rev. E 84, (2011).

[22] Grappin R. Müller W.-C. Scaling and anisotropy in magnetohydrodynamic turbulence in a strong mean magnetic field. Phys. Rev. E vol. 82 pp. 26406 (2010)